第 38 卷第 6 期
2018 年 3 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.6
Mar.,2018

DOI: 10.5846/stxb201701140115
何宝忠,丁建丽,李焕,刘博华,陈文倩.新疆植被物候时空变化特征.生态学报,2018,38(6):2139-2155.
He B Z, Ding J L, Li H, Liu B H, Chen W Q.Spatiotemporal variation of vegetation phenology in Xinjiang from 2001 to 2016.Acta Ecologica Sinica,2018,38(6):2139-2155.

新疆植被物候时空变化特征

何宝忠[1,2],丁建丽[1,2,*],李 焕[1,2],刘博华[1,2],陈文倩[1,2]
1 新疆大学资源与环境科学学院智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室,乌鲁木齐 830046
2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室,乌鲁木齐 830046

摘要:基于 MODIS-NDVI 数据,提取新疆 2001—2016 年典型植被物候期,分析新疆不同生态分区的山地-绿洲系统植被物候期的时空演变趋势和空间分异特征,并结合同期气象数据,探讨植被物候与气候变化的响应关系。结论为:①新疆植被物候具有明显的纬向分布和垂直地带性分布特征,海拔在物候的地域分异中扮演着重要作用。新疆植被生长季开始时间(Start of season, SOS)集中于 3 月中旬至 5 月上旬,生长季结束时间(End of season, EOS)集中于 10 月中旬至 12 月下旬。②与全球大背景下典型植被物候特征变化趋势相反,新疆植被 SOS 呈推迟趋势,推迟幅度为 1.9d/10a;EOS 呈提前趋势,提前幅度为 3.66d/10a;生长季长度(Length of season, LEN)呈缩短趋势,缩短幅度为 5.6d/10a。除东疆地区外,全疆及不同分区均呈现出绿洲及平原 SOS 较早,山地区域较迟;全疆及不同分区均呈现出山地 EOS 结束较早,绿洲结束较迟;除东疆地区外,全疆及不同分区的 LEN 均为绿洲及平原区域>山地,同样显示出垂直地带性分布的特征。③通过冗余分析(Redundancy analysis, RDA)解释了物候特征与气象因子关系的绝大部分信息,生长季开始时间受春季气温、前一年冬季降水量和日照时数的显著影响。夏季和秋季降水量是新疆植被生长季结束时间的重要影响因素,在总体上受气温和日照时数的影响较小。

关键词:植被物候;山地-绿洲系统;时空变化;气候变化;新疆

Spatiotemporal variation of vegetation phenology in Xinjiang from 2001 to 2016

HE Baozhong[1,2], DING Jianli[1,2,*], LI Huan[1,2], LIU Bohua[1,2], CHEN Wenqian[1,2]
1 *Xinjiang Common University Key Lab of Smart City and Environmental Stimulation, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *China*
2 *Key Laboratory for Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *China*

Abstract: Typical phenological metrics (start of the season, SOS; end of the season, EOS; and length of the season, LEN) were estimated using moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)-normalized difference vegetation index (NDVI) data from 2001 to 2016. Then, the phenological interannual variation trend and its spatial pattern were analyzed for the ecological mountain-oasis-desert system (MODS) in Xinjiang and its sub-regions, and the relationship between the vegetation changes and the climate variations were discussed in combination with the meteorological data. The following results were obtained in this study. The phenological characteristics in Xinjiang exhibited obvious zonal and vertical zonal distribution characters, and the altitude plays an important role in the regional differentiation of phenology. The SOS and EOS ranged from mid-March to early-May, and mid-October to late-December, respectively. Contrary to the global phenological change direction, the SOS was delayed in Xinjiang with a delayed amplitude of 1.9 days in every 10 years, the EOS was advanced with an advanced amplitude of 3.66 days in every 10 years, and the shortened LEN amplitude was 5.6 days in every 10 years. The SOS was earlier at the oasis and plain regions but later in the mountain area in the entire

基金项目:国家自然科学基金项目(41771470, U1303381, 41261090);自治区重点实验室专项(2016D03001);自治区科技支疆项目(201591101);2014 级新疆大学博士生科技创新项目(XJUBSCX-2014013);教育部促进与美大地区科研合作与高层次人才培养项目
收稿日期:2017-01-14; **网络出版日期**:2017-12-19
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: Ding_jl@ 163.com

Xinjiang area except for the Eastern part. The EOS occurred earlier in the mountain and later in the oasis region of the entire Xinjiang area and different partition zones. The LEN range changed from the oasis and plain to the mountain areas except for the eastern part and showed a vertical zoning character. Based on the redundancy analysis (RDA), which explains most of the relationship information between the phenological characters and the climate factors, the SOS was remarkably influenced by spring temperatures, the year before the winter rainfall and sunshine duration. Summer and autumn precipitation was the important influencing factor for the EOS, which was affected by the temperature and sunshine duration, although the effect was limited. We may have to consider the changing amplitude as the main and secondary factor that affects the phenology metrics when studying the associated interannual variation. This is because various influencing factors may have different effects and change the direction of the advanced or delayed vegetation phenology, which ultimately affects the phenological characteristics of the interannual trend.

Key Words: vegetation phenology; mountain-oasis system; spatiotemporal variation; climate change; Xinjiang

植物物候是指植物受生物因子和非生物因子如气候、水文、土壤等影响而出现的以年为周期的自然现象,是植物长期适应环境的季节性变化而形成的生长发育节律[1]和集中于对物候事件的关注[2],同时是植物应对环境变化时表现出的一系列生活史对策,关系到植物物体本身的生存繁衍和群落生物多样性的维持[3]。植被物候是最精确响应气候变化的敏感性指标之一[4],在生态系统碳循环和水循环方面起着重要作用[5],而且不同农作物的物候阶段特征对于如灌溉、施肥等的农业活动提供了关键信息[6],也是基于遥感植被指数来估测作物产量的关键输入变量[7-8]。从 20 世纪 80 年代以来,北半球部分区域增温显著,使人们越来越关注植被物候期及其对气象变化的响应研究[9]。

大量研究表明,气候变暖提前了生长季始期,延迟了生长季末期的到来[3,10],从而带来更长的生长季长度[11]。在过去的几十年,北半球、欧洲和北美大部分植被的春季萌发期呈提前趋势[12-13]。许多研究者认为温度与植物物候变化最具相关性[3,14],但是对一些植物,温度仅影响到对植物一些可见的物候相,如叶着色等进行调节和诱导作用[3,15]。我国学者主要在北半球中高纬地区[12]、中亚地区[16]、以及中国大陆[17]、中国温带地区[18]、中国东部地区[19-21]、华北地区[22]、青藏高原[13,23-24]、北方农牧交错带[25]、内蒙古草原[26]、秦岭山地[27]、黑河流域[28]等地区进行了植被物候研究,总体上可以得出生长季提前是中国植被对全球变化响应的最主要方式,但存在区域性差异[17],同时中国温带植被物候的生长时间延长,物候始期提前,物候末期推迟,这些变化主要是因为增温的趋势所致[18];因此,我国学者对于上述区域的研究也表明了温度是驱动植被物候变化的重要影响因素。国外学者主要集中在 2014 年之前对世界各地进行植物物候研究,而且特别重视对于农作物物候的研究,如 Zeng 等[29]利用 2009—2012 年 MODIS-WDRVI 数据和陆面地表温度数据研究了美国内布拉斯加州和爱荷华州的玉米和大豆的物候期,结果表明所用的融合形状拟合模型的两步滤波法提取物候信息的精度较高,同时表明种植时间由北向南逐渐提前和由于增温的影响,2012 年作物开始生长的时间早于其他年份;Melaas 等[30]以 TM/ETM+ EVI 为数据源,利用陆地卫星物候反演算法(Landsat phenology algorithm, LPA)对北美地区 1982—2013 年的温带和北方森林的物候特征进行了反演研究,并与地面实测资料和以 MODIS 物候产品数据的反演结果进行了比较,结果表明 LPA 法与地面实测值具有高度的一致性;Dong 等[31]以 Landsat8 为数据源,运用基于物候与像元的水稻制图法(phenology- and pixel-based paddy rice mapping, PPPM)结合谷歌引擎(Google Earth Engine, GEE)对东北亚地区(日本、朝鲜、韩国、中国东北部)2014 年的水稻种植区进行了制图,生产者、用户精度分别达到了 73%和 92%。

以上国内外研究主要运用的是遥感类的方法来研究大区域尺度的物候变化特征,这是因为遥感观测具有覆盖范围广、连续性强的特点,弥补了传统物候观测手段的不足[32]。遥感方法提取物候参数是基于传感器获取植被的绿度信息,与传统意义上植被物候期如出苗、展叶、抽穗和开花不严格一致,但它能在宏观上反映植被物候关键信息的相对状况[23]。相关学者已经研究了整个中国不同地区植被的物候特征[16-28],但研究区域

明显集中于我国中东部和北部地区,极少有对处于西北内陆的新疆地区做系统的研究。虽然相关学者[13,16-18]等所研究的中亚和温带区域包括新疆地区,但这些研究主要是从总体上分析这些区域在 2006 年之前植被物候的发展趋势,且主要用的是分辨率低于 1km 分辨率的 MODIS-NDVI/EVI、SPOT-VGT 和 NOAA AVHRR-NDVI 等数据,没有探讨近 10 多年来全疆及不同分区的植被物候空间细节上的变化特征,因为不同的分区有着自身独特的气候特点、生态特征、行政区界限等特点[33];因此,本研究运用 500m 分辨率的 MOD13A1-NDVI 数据提取新疆 2001—2016 年植被的典型物候期,包括生长季开始时间(Start of season, SOS)、生长季结束时间(End of season, EOS)和生长季长度(Length of growth season, LEN),结合同期气象数据,从宏观角度定量角度揭示气候与新疆植被物候变化的响应关系。

1　研究区域

新疆位于中国西北部,其"三山夹两盆"的地域结构使得植被具有明显的纬向水平地带性分布规律[34],为典型的山地-绿洲-荒漠系统(MODS, mountain-oasis-desert system)[33-34]。全疆属于明显的温带大陆性气候,气温温差较大,降水量少,气候干燥;森林稀少,植被覆盖率低。土地沙质荒漠化、土壤盐渍化明显,使其生态环境极其脆弱[35]。结合相关学者[35-37]的研究,把新疆分为东疆、南疆、北疆及伊犁地区,每个分区又分为山地、绿洲、荒漠和平原,其中伊犁地区只有山地和平原。基于此,将新疆共划分为 2001—2016 年 11 年 4 个分区在内的共 11 个子区(图 1)。

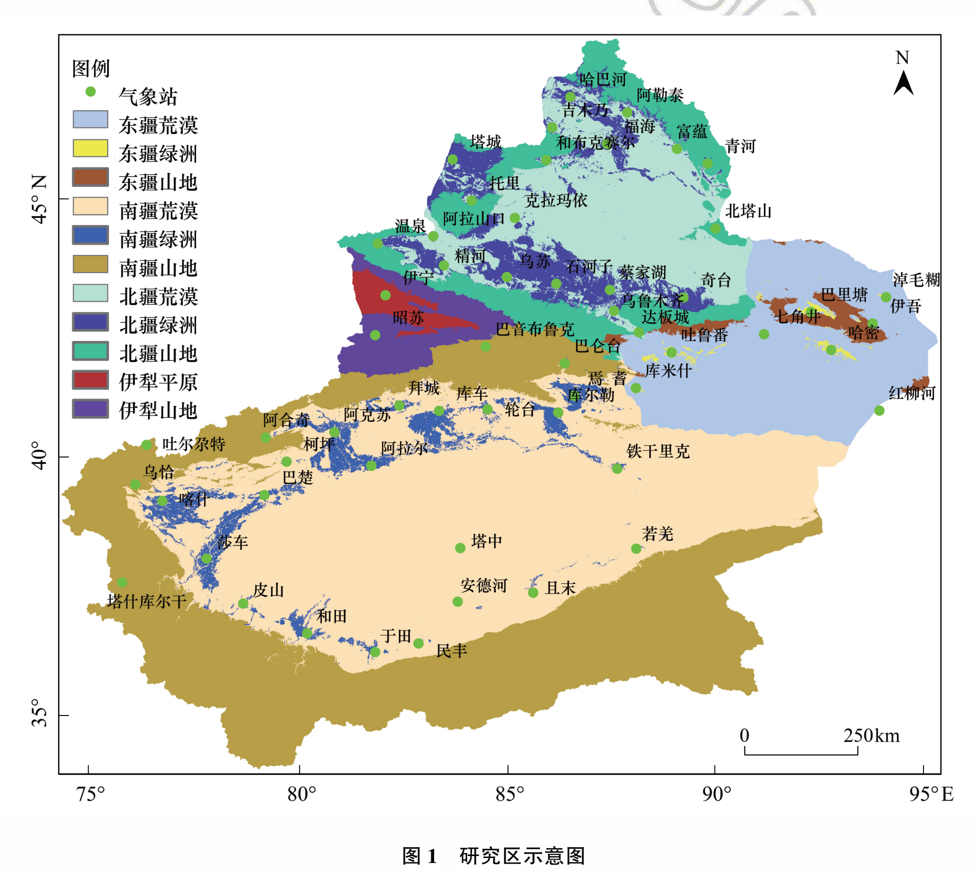


图 1　研究区示意图

Fig.1　Sketch of different sub-regions in the study area

2　数据与处理方法

2.1　数据来源与预处理

NDVI 数据:从美国国家航空航天局 NASA 的 EOS/MODIS 数据网(ladsweb.nascom.nasa.gov)下载,内容为

栅格归一化植被指数(NDVI),MOD13A1,周期为16天,将全年划分为23个时段500m分辨率的3级正弦投影产品[38]。应用MRT(MODIS Reprojection Tool)工具将下载的数据进行格式和投影转换、图像拼接和裁切[21]。气象数据:选取新疆自治区内53个气象站2001—2012年的中国地面气候资料月值数据集,包括气温、降水和日照时间,数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/)。站点数据均匀分布在了全疆不同地理位置、气候带、地类且具有较好同质性的地区,能较好的从总体上代表研究区的气候情况(图1)。2013—2015年虽有中国地面国际交换站气候资料日值数据集,但只有18个站点,不能很好的表示研究区域的总体气候特征,因此只讨论研究区2001—2012年物候特征与气候因子的关系。将站点月实测数据求平均,作为整个研究区的气候月均值。DEM来源于美国地质勘探局USGS网站(http://www.usgs.gov/)的SRTM数据,分辨率为90m,为了与所用的MODIS影像分辨率一致,把SRTM数据重采样为500m分辨率的DEM数据。

2.2 研究方法

2.2.1 时间序列数据的预处理

虽然所采用的数据经过了16天最大值合成法的处理,但云和大气对获取的遥感影像的影响依旧很大,带来一些噪声,需要对其进一步平滑处理[25]。由于Savitzky-Golay滤波可以消除噪声的影响,平滑后重构的曲线很好的体现了NDVI时序数据的"峰"、"谷"特征[25]。因此本文运用TIMESAT[39]软件采用Savitzky-Golay滤波处理,得到重建后的NDVI曲线。拟合公式为:

$$Y_j = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_i Y_{j+i}}{N} \tag{1}$$

式中,Y_j为拟合之后的序列数据,Y_{j+i}为原始序列数据,C_i为滤波系数,N为滑动窗口的大小($2m+1$)。

2.2.2 物候期的确定

植被物候信息提取的方法包括6类常用方法:阈值法、滑动平均法、拟合法、最大斜率法、累积频率法和主成分分析法[32]。采用动态阈值法从NDVI数据集中提取新疆植被物候的始末期(SOS,EOS)。主要是因为北半球尺度上区域水热条件限制,动态阈值的检测方法更适合内部差异较大的地区[12],是确定大尺度区域植被物候较为合适的方法[27]。动态阈值法的计算方法通常为:

$$NDVI_{thre} = (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \times C \tag{2}$$

式中,$NDVI_{thre}$为最后确定的阈值,$NDVI_{max}$为NDVI上升阶段的最大值,$NDVI_{min}$为NDVI下降阶段的最小值,C为系数或称百分比。

根据相关学者[16,19]的研究,本文将SOS和EOS的系数都设置为20%。用儒略历(Julian calendar)计算法(1月1日为一年中第1天)进行物候期统计分析[24]。由于荒漠地区植被稀少,植被物候特征受到土壤背景的影响严重[17,40],因此根据历年分区文件和土地利用图去除荒漠、水体、冰川及积雪区域,只在全疆的山地、绿洲及平原区域进行研究。

2.2.3 物候特征年际变化趋势计算

研究中普遍采用最小二乘法分析SOS,EOS和LEN的年际变化趋势[13],因此本研究采用一次线性方程来定量描述植被物候期的变化趋势,即以年代t为时间因子,植被物候期y为模拟对象,建立y与t之间的线性回归方程[21,26]:

$$y = c + bt \tag{3}$$

$$b = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n}(i \times P_i) - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} P_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - (\sum_{i=1}^{n} i)^2} \tag{4}$$

式中,c,b为待定系数,其中b为倾向值,若$b>0$表示研究的要素呈上升趋势,$b<0$表示研究的要素呈下降趋势,$b \times 10$称为倾向率,单位为d(天)/10a(年)。n表示年数,文中该值为16;P_i为植被生长季在第i年的

开始日期、结束日期或生长季长度。受各种环境因素的的影响,有些像元的 *SOS*,*EOS* 和 *LEN* 在某些年份无效,因此对于同一像元累积有效年数大于等于 7 年的有效像元用此方法进行分析,并对上升和下降的趋势做显著性检验,根据是否具有显著性分为显著、不显著和无变化的情况。用最小二乘法来确定 c、b 系数。

2.2.4 物候特征与海拔之间的关系

相关研究结果表明海拔与植被物候变化存在明显的海拔分异规律[13],因此在 DEM 上通过随机选点的方式(至少间隔 4km),共选出 3000 个样点,这些样点均匀的分布在新疆不同海拔高度上,然后提取每个样点的高程值和对应像元中 SOS、EOS 和 LEN 值,做成新疆植被物候多年均值与海拔高程之间的散点图,通过线性拟合的方式来探讨新疆地区植被物候特征的海拔分异规律性特点。

2.2.5 冗余分析(RDA)

冗余分析 RDA (Redundancy analysis)是生态学中的一种直接梯度排序法,可以分析解释变量和多个响应变量之间的关系,已被广泛应用于土壤、生态、环境和气候等领域[41]。与常规的统计分析相比,RDA 所包含的信息量更大,它以样方为基础,通过箭头方向和长度等在排序图上直观的表达出各要素之间的相关性和影响程度。因此,本研究应用 RDA 来分析植被物候特征与气象因子间的响应关系。RDA 分析和作图应用国际标准通用软件 CANOCO 4.5。

3 结果与讨论

3.1 植被物候提取结果的精度验证

由于中国新疆干旱区物候观测点和数据都极度缺乏,仅有的物候观测站点范围小且物种分布混杂,很难直接与较粗分辨率的遥感数据相匹配,因此根据相关学者的研究,采用在新疆分布面积广泛的春小麦的出苗时间作为校准数据,是因为在没有精确的数据采集坐标下,可以假定该观测数据代表气候站点周围春小麦的出苗时间[42]。各气象站点作物及发育数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/)的中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集,共整理出 86 个样本点数据。

由验证结果来看(图 2),新疆植被物候有显著的分区特征,呈明显的团块状分布,北疆与伊犁地区春小麦的出苗时间较迟,东疆和南疆较早,由于南北疆气候的显著差异,遥感监测与实测值的响应关系不一定一致,如果把这两个区域进行总体验证必然会带来误差,因此对这两个大的区域分别进行验证。可以得出在不同分区中遥感监测值与实测值均呈极显著的线性关系(P 值均≤0.001),在北疆和伊犁地区二者之间的相关系数为 0.466,在东疆和南疆达到了 0.572。从整个验证结果来看,遥感监测均值为第 90.08 天,实测春小麦出苗期为第 102.58 天,二者总体上相差 12.50d,这与相关学者[42]的研究结论相近(二者相差 18.40d),因此由以上分析可得基于动态阈值的遥感监测方法能够从整体上正确反映研究区植被物候特征。

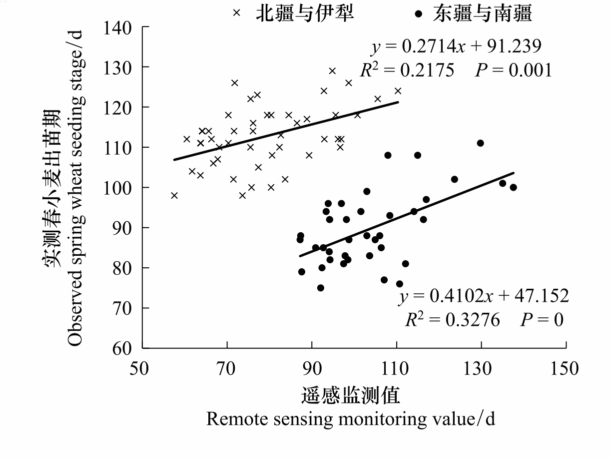


图 2　植被物候特征提取精度验证

Fig.2　Validation result of vegetation phenological metrics based on the observed spring wheat data of different sub-regions in the study area

3.2 植被物候多年均值的空间分布特征

3.2.1 生长季开始时间(SOS)空间变化特征

图 3 SOS 为新疆多年 SOS 平均空间分布。总体上,全疆山地区域 SOS 较迟,晚于第 120 天,绿洲及平原地区 SOS 较早,早于第 120 天,但地域差异明显。在伊犁平原、部分绿洲区域(主要在北疆绿洲、东疆吐鲁番市绿洲)、离绿洲较近的天山山麓地区和昆仑山山麓地区、沿阿尔金山山麓至外围绿洲区域、拜城县绿洲外围至

天山山麓的 SOS 早于第 90 天。除南疆昆仑山附近绿洲 SOS 早于第 100 天外,其他南疆地区的绿洲 SOS 主要集中于第 110—150 天。东疆绿洲东部 SOS 集中于第 110—150 天,东疆西部绿洲 SOS 集中于早于第 120 天。北疆大部分绿洲区域 SOS 早于第 120 天,天山山麓的部分绿洲(主要位于北疆南部绿洲)SOS 集中于第 110—140 天。全疆山地区域的 SOS 在较低海拔区大部分晚于第 110 天,在山顶较高海拔及积雪区周边晚于第 150 天。从多年平均值的统计分析可以得到:(1)对于绿洲 SOS:南疆(118.71)>东疆(114.82)>北疆(94.60);(2)对于山地 SOS:南疆(120.88)>伊犁(105.07)>北疆(101.84)>东疆(101.00);(3)因此可以得出,对于全疆任何分区的 SOS 均明显的表现出从南往北逐渐提前的纬向分布特征,这与相关学者等的研究一致[20]。以上分析也表明全疆植被物候表现出明显的垂直地带性分布的特征,海拔每升高 1000m,SOS 推迟 8.9d(图 4 SOS),而青藏高原每升高 1000m,SOS 推迟 9.0d[13],说明海拔高度对新疆 SOS 的影响与青藏高原类似。

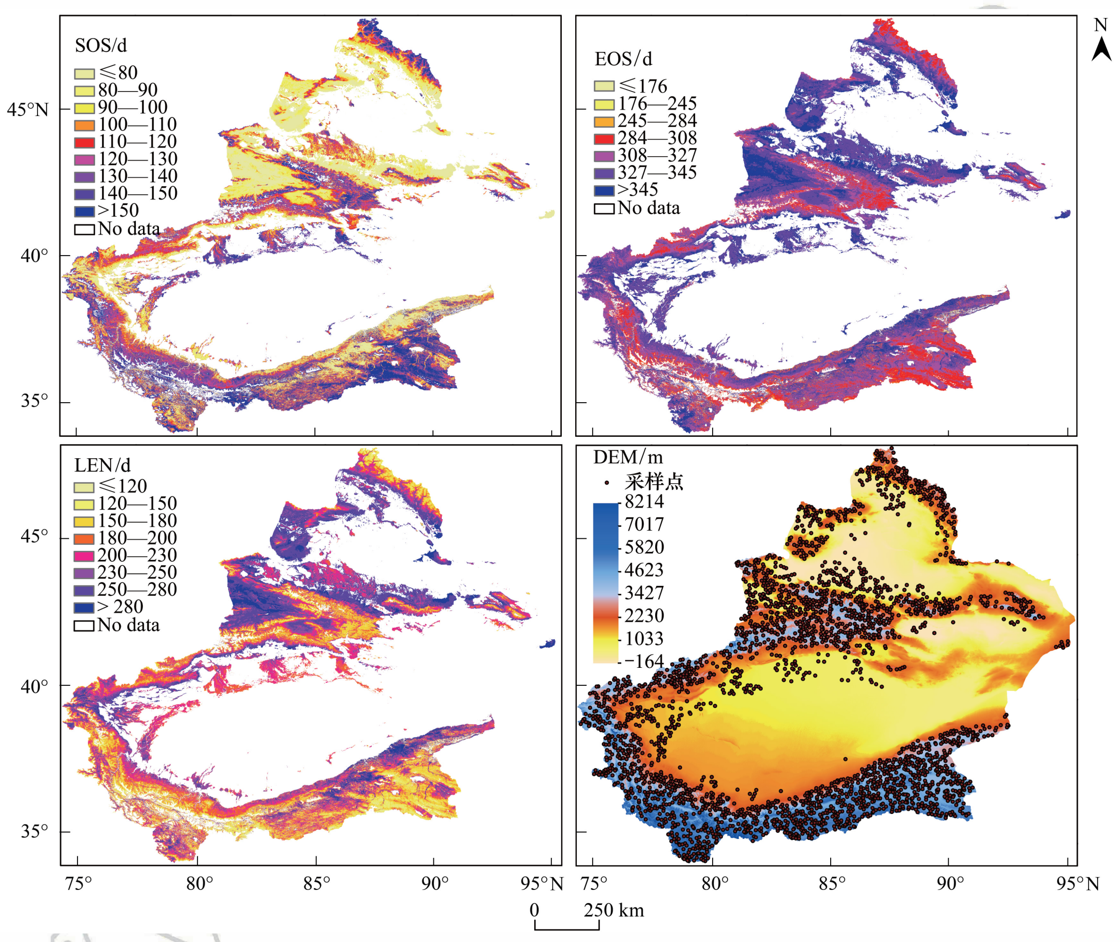


图 3 新疆植被物候特征多年均值的空间分布

Fig.3 Average spatial distribution of the phenological parameters during 2001—2016 in Xinjiang

SOS:生长季开始时间, Start of season; EOS:生长季结束时间, End of season; LEN:生长季长度, Length of season; DEM:海拔高度, Digital elevation model

3.2.2 植被生长季结束时间(EOS)空间变化特征

图 3 EOS 为新疆多年 EOS 平均空间分布。总体上,山区 EOS 结束较早,早于第 327 天,绿洲及平原区域结束较迟,晚于第 327 天,地域性差异同样明显;EOS 与 SOS 分布情况大体相反,即表现为 SOS 越早的区域,EOS 越迟;同时,EOS 比 SOS 表现的更为集中,集中晚于第 300 天以上。在南疆部分绿洲区域、南疆荒漠中沿河流分布的绿洲区域、伊犁平原、昆仑山最南部地区、昆仑山和阿尔金山中分布有河流或山谷沿线等区域的 EOS 均晚于 12 月中旬(第 345 天)。全疆绿洲 EOS 集中于 10 月份之后(大于第 308 天);山地区域中离积雪或冰川分布较近的区域和阿尔金山东南部集中于 10 月上旬—11 月上旬(第 284—308 天),分布较远的区域

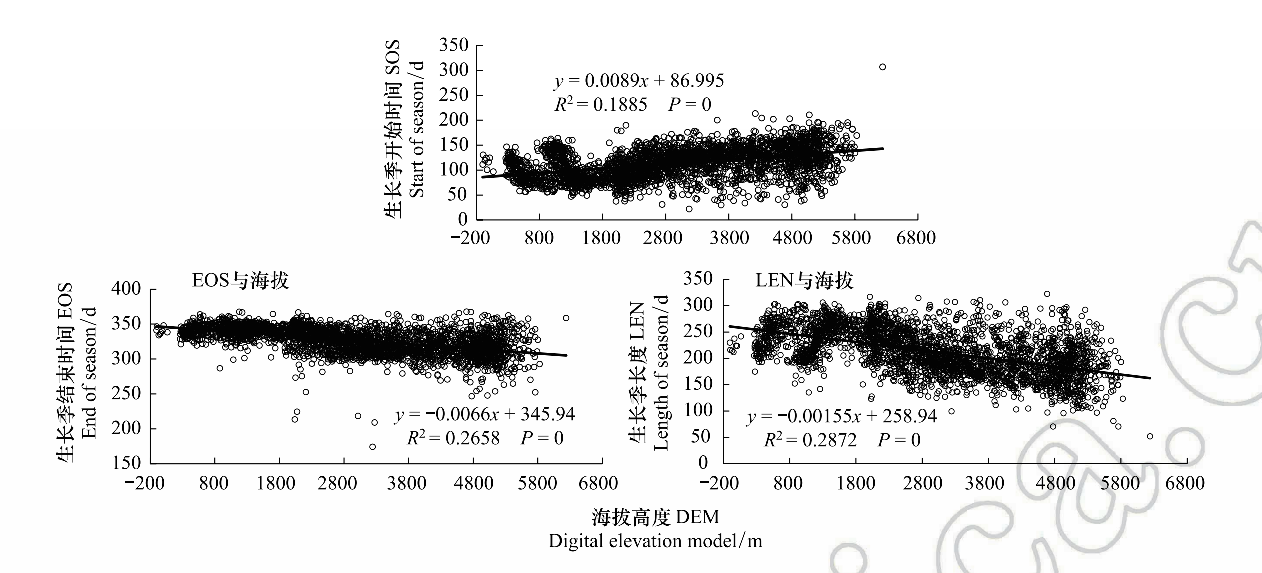


图 4　2001—2016 年间新疆植被物候多年均值与海拔之间的关系

Fig.4　Changes in the mean of SOS, EOS and LEN during 2001—2016 along altitude gradient in Xinjiang

SOS:生长季开始时间, Start of season; EOS: 生长季结束时间, End of season; LEN: 生长季长度, Length of season; DEM: 海拔高度, Digital elevation model

集中于第 308—327 天;但是从全疆范围来看,离冰川积雪区更远的地理位置,如山地和绿洲之间的过渡带,在这个过渡带中 EOS 集中于第 327—345 天,这与绿洲 EOS 几乎一致。从多年平均值的统计分析可以得到:(1)对于绿洲 EOS,东疆(333.46)<南疆(339.37)<北疆(340.64);(2)对于山地 EOS,南疆(320.59)<东疆(328.98)<北疆(329.26)<伊犁(329.73);(3)因此可以得出,绿洲和山地区域的 EOS 并没有表面出明显的纬向分布特征。以上分析也表明,EOS 的变化表现出明显的垂直地带性分布的特征,海拔每升高 1000m,EOS 提前 6.6d(图 4 EOS),而青藏高原每升高 1000m,EOS 提前 1.0d[13],说明海拔高度对新疆 EOS 的影响更大。

3.2.3　植被生长季长度(LEN)空间变化特征

图 3 LEN 为新疆多年 LEN 平均空间分布。总体上,山区 LEN 较短,小于 180d,绿洲及平原 LEN 大于 180d,但地域性差异同样明显。北疆南部绿洲 LEN 集中于 200—250d;北疆北部绿洲 LEN 集中于 250—280d。东疆绿洲 LEN 集中于 180—230d,伊犁平原 LEN 集中于 250—300d,南疆绿洲 LEN 集中于 180—230d。全疆山地区域的 LEN 均较小:离积雪区较近的距离 LEN 集中于 120—150d,较远的距离集中于 150—180d,更远的距离集中于 180—230d;山谷(200—250d)明显比山峰(120—150d)的生长季长,即从海拔高处向低处渐变增长;在南疆的昆仑山和阿尔金山中,除了距离绿洲区域较近的山地区域外,其他山地区域的 LEN 普遍偏低,低于 180d;低值区集中于由昆仑山中部和阿尔金山中部及其东南部所构成的宽条块状区域中,以及天山山脉、阿尔泰山山脉等区域。从多年平均值的统计分析可以得到:(1)对于绿洲 LEN,东疆(218.65)<南疆(220.66)<北疆(246.04);(2)对于山地 LEN,南疆(199.71)<伊犁(224.66)<北疆(227.42)<东疆(227.98);(3)因此可以得出,除东疆外,全疆任何分区的生长季长度均表现出从南向北逐渐延长的纬向变化趋势。以上分析也表明,LEN 的变化表现出明显的垂直地带性分布的特征,海拔每升高 1000m,LEN 缩短 15.5d(图 4),而青藏高原海拔每升高 1000m,LEN 缩短 9.0d[13],说明海拔对新疆 LEN 的影响更加显著。

3.3　物候年际变化特征分析

3.3.1　物候期年际变化的时间特征

由图 5 SOS 和图 6 SOS 可得到以下结论:①全疆:SOS 总体为绿洲(104.94)<山地(113.70);全疆 SOS 呈不显著推迟趋势,推迟速率为 1.9d/10a,这与全球大环境下 SOS 提前的结论相反[3],说明在新疆区域内有别于大环境下的地理气候环境的分布,极可能是由于气温、降水或日照时间长度等气候要素所主导变化的不同影响方式和方向所致;本研究 SOS 变化幅度的结果表明要低于全球的 3d/10a[43]、北半球的(4.0 ±0.8)d/

10a[12,44]、欧亚大陆的 2.2—3.3d/10a[12,45]、中国温带的 7.9d/10a[18]，青藏高原的 6.0d/10a[13]，高于北美大陆的 0.3d/10a[12]；全疆绿洲 SOS 呈显著推迟趋势（P=0.015），推迟速率为 5.6d/10a；全疆山地 SOS 呈不显著推迟趋势，推迟速率为 1.2d/10a，因此可以得出绿洲 SOS 变化的更加剧烈，可能是因为受到人类活动的影响更大所致。②分区：东疆 SOS 总体为山地（101.00）<绿洲（114.82），山地、绿洲区域 SOS 均呈不显著推迟趋势，推迟速率分别为 5.7d/10a 和 4.1d/10a；南疆绿洲与山地区域的先后顺序呈历年交替的方式进行，总体上绿洲（118.71）<山地（120.88），南疆绿洲区域 SOS 呈显著推迟趋势（P=0.001），推迟速率为 8.4d/10a，南疆山地区域 SOS 呈不显著推迟趋势，推迟速率为 3.7d/10a；北疆 SOS 总体为绿洲（94.60）<山地（101.84），绿洲 SOS 呈不显著推迟趋势，推迟速率为 4.0d/10a，山地 SOS 呈不显著提前趋势，提前速率为 3.4d/10a；伊犁 SOS 总体为平原（74.12）<山地（105.07），平原区呈显著推迟趋势（P=0.034），推迟速率为 7.6d/10a，山地呈不显著提前趋势，提前速率为 6.4d/10a。③从以上分析可以得出，总体上，全疆和不同分区均呈现出绿洲及平原地区（除东疆外）的 SOS 较早，山地区域较迟，总体上二者之间相差 9d 左右；除北疆山地和伊犁山地 SOS 呈提前趋势，全疆其他分区 SOS 均呈推迟趋势。

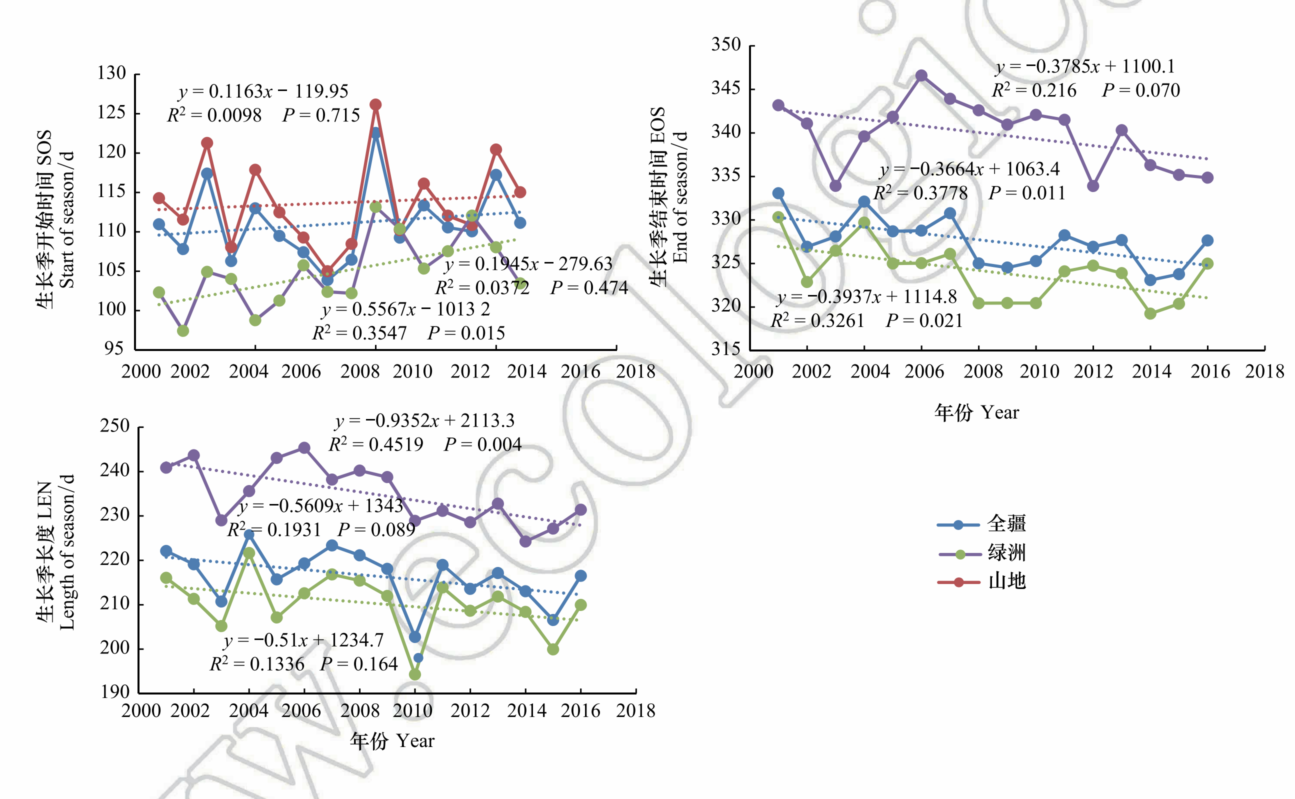


图 5 2001—2016 年新疆地区植被物候总体年际变化

Fig.5 Inter-annual variation of Xinjiang's SOS, EOS and LEN from 2001 to 2016

由图 5 EOS 和图 6 EOS 可得到以下结论：①全疆：EOS 总体为山地（324.00）<绿洲（339.86）；全疆 EOS 呈显著提前趋势（P=0.011），提前速率为 3.66d/10a，该结论与全球大背景下 EOS 呈推迟的趋势相反[3]，这个变化幅度的结果高于全球尺度的 0.5d/10a[43]、北半球的 2.3d/10a[44]、青藏高原的 2.0d/10a[13]，低于中国温带的 3.7d/10a[18]、欧亚大陆的 6.1d/10a[45]，表明新疆 EOS 的年际变化相对于大背景下更加剧烈；全疆绿洲 EOS 呈不显著提前趋势，山地 EOS 呈显著提前趋势（P=0.021），提前的幅度分别为 3.8d/10a 和 3.9d/10a。②分区：东疆 EOS 总体为山地（328.98）<绿洲（333.46），山地与绿洲 EOS 均呈不显著提前趋势，提前速率分别为 6.4d/10a 和 0.3d/10a；南疆 EOS 总体为山地（320.59）<绿洲（339.37），绿洲与山地 EOS 均呈不显著提前趋势，提前速率分别为 2.9d/10a 和 3.8d/10a；北疆 EOS 总体为山地（329.26）<绿洲（340.64），山地 EOS 呈显著提前趋势（P=0.024），绿洲 EOS 呈不显著提前趋势，提前速率分别为 4.4d/10a 和 4.5d/10a；伊犁地区 EOS 总体为山地

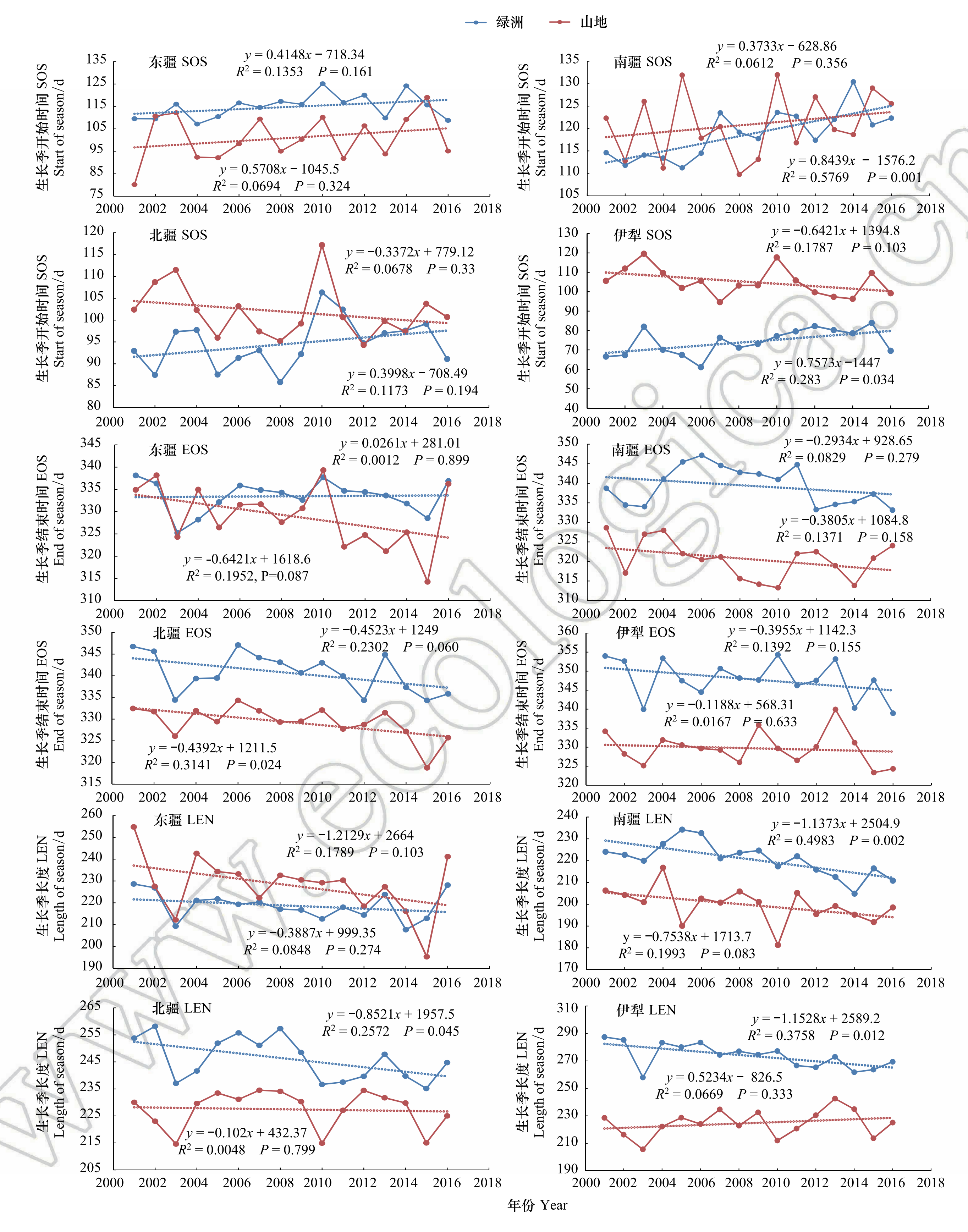


图 6　新疆不同分区植被物候特征的年际变化

Fig.6　Inter-annual variation of SOS, EOS and LEN for sub-regions in Xinjiang from 2001 to 2016

SOS:生长季开始时间,Start of season;EOS:生长季结束时间,End of season;LEN:生长季长度,Length of season

(329.73)<平原(347.90),平原和山地 EOS 均呈不显著提前趋势,提前速率分别为 4.0d/10a 和 1.2d/10a。③以上分析表明,新疆总体和不同分区均呈现出山地 EOS 结束较早,绿洲结束较晚,总体上二者相差 16d 左右,全疆及不同分区的 EOS 均呈提前趋势。

由图 5 LEN 和图 6 LEN 可得到以下结论:①全疆:LEN 总体为为绿洲(234.93)>山地(210.31);全疆 LEN 呈不显著缩短趋势,缩短的幅度为 5.6d/10a,这个变化幅度的结果与全球生长季长度呈增长的趋势相反[3],这是由 SOS 和 EOS 所决定,数值要高于全球的 3.8d/10a[43],与北半球的 5.6d/10a 相等[44],低于青藏高原的 8.0d/10a[13]、欧亚大陆的 13.3d/10a[45]、中国温带的 11.6d/10a[18];全疆绿洲 LEN 呈显著缩短趋势($P=0.004$),山地 LEN 呈不显著缩短趋势,缩短的幅度分别为 9.4d/10a 和 5.1d/10a。②分区:东疆 LEN 总体为山地(227.98)>绿洲(218.65),山地和绿洲 LEN 均呈不显著缩短趋势,缩短的幅度分别为 12.1d/10a 和 3.9d/10a;南疆 LEN 总体为绿洲(220.66)>山地(199.71),绿洲 LEN 呈显著缩短趋势($P=0.002$),山地 LEN 呈不显著缩短趋势,缩短的幅度分别为 11.4d/10a 和 7.5d/10a,可得绿洲区域的变动幅度更大,可能受人类活动的影响较大所致;北疆 LEN 总体为绿洲(246.04)>山地(227.42),绿洲 LEN 呈显著缩短趋势($P=0.045$),山地 LEN 呈不显著缩短趋势,缩短的幅度分别为 8.5d/10a 和 1.0d/10a;在整个北疆地区,每隔几年其 LEN 会有比较大的波动,如 2003 年,2010 年,2015 年等,与其他较平稳的年份相差在 10d 以上;伊犁 LEN 总体为平原(273.78)>山地(224.66),平原 LEN 呈显著缩短趋势($P=0.012$),缩短的幅度为 11.5d/10a,山地 LEN 呈不显著增加趋势,增加的幅度为 5.2d/10a。③从总体上看,除东疆区域外,全疆及不同分区的 LEN 均为绿洲及平原区域>山地,二者总体上相差近 25d,同样显示出垂直地带性分布的特征;除伊犁山地区域外,全疆其他分区的 LEN 均呈缩短趋势。

3.3.2 物候期年际变化的空间分布特征

由图 7 SOS 可得以下结论:①从总体可得,全疆 SOS 在山地区域呈提前趋势,在绿洲及平原地区呈推迟趋势,全疆 SOS 总体呈推迟趋势。SOS 提前、无明显变化和推迟的区域分别占有效像元的 38.92%,0.05% 和 61.03%,可见推迟的区域占了大部分比例。②37.82%的区域不显著提前,只有 1.10%的区域显著提前。提前的区域主要分布在全疆的山地区域,提前幅度集中于 0—20d/10a,但在部分山地区域(昆仑山南部,阿尔金山东南部)的提前幅度达到了 20—30d/10a,较少部分区域达到了 30—40d/10a,在阿尔金山东南部部分稀疏植被区达到了大于 40d/10a 的变化幅度。③无明显变化的区域极少,绝大部分区域都呈现一定程度的变动。④5.27%的区域呈显著推迟,主要分布在全疆各个绿洲和平原,包括北疆绿洲、东疆绿洲(主要是托克逊县绿洲)、伊犁平原和南疆绿洲。北疆绿洲推迟的幅度集中于大于 10d/10a;南疆绿洲推迟度的幅度集中于大于 10d/10a;伊犁平原推迟幅度集中于 0—20d/10a;东疆绿洲推迟幅度集中于 0—30d/10a。⑤59.72%的地区呈不显著推迟,不显著推迟的区域主要位于山地与绿洲、山地与荒漠、山地与平原等的过渡带上,推迟的幅度集中于 0—20d/10a,其中离山地较近的区域推迟的幅度集中于 0—10d/10a,较远的区域集中于 10—20d/10a。在南疆的昆仑山和阿尔金山具有较高植被覆盖度的灌丛和草地区域,以及在北疆东部的天山边缘区也主要呈现为不显著推迟的特征,推迟的幅度集中于大于 10d/10a,在其边缘区推迟的幅度集中于大于 30d/10a。

由图 7 EOS 可得以下结论:①从总体上可得,除新疆伊犁和阿尔金山东南部的部分区域外,全疆其他区域的 EOS 主要呈现的是提前趋势。EOS 提前、无明显变化和推迟的区域分别占有效像元的 65.91%,0.07% 和 34.02%。②7.16%的区域呈显著提前趋势,主要呈零星块状分布于北疆的绿洲、山地,以及南疆泽普县、莎车县、麦盖提县、伽师县、疏勒县的绿洲区域,提前的幅度集中于大于 20d/10a。58.75%的区域呈不显著提前趋势,广泛分布于全疆各个区域,大部分北疆、南疆、东疆的山地和绿洲区域,以及伊犁北部山地区域和农用地区均呈提前趋势,提前的幅度集中于 0—30d/10a。③无明显变化的区域极少,大部分都存在不同的变化幅度。④1.43%的区域呈显著推迟趋势,32.60%的区域呈不显著推迟趋势,主要分布于东疆海拔较高的山地区域和部分绿洲区域,天山山脉中部,伊犁山地南部、东南部与东北部和大部分平原农用地区,昆仑山高海拔有积雪附近区域和阿尔金山东南部区域,推迟的幅度集中在 0—30d/10a。

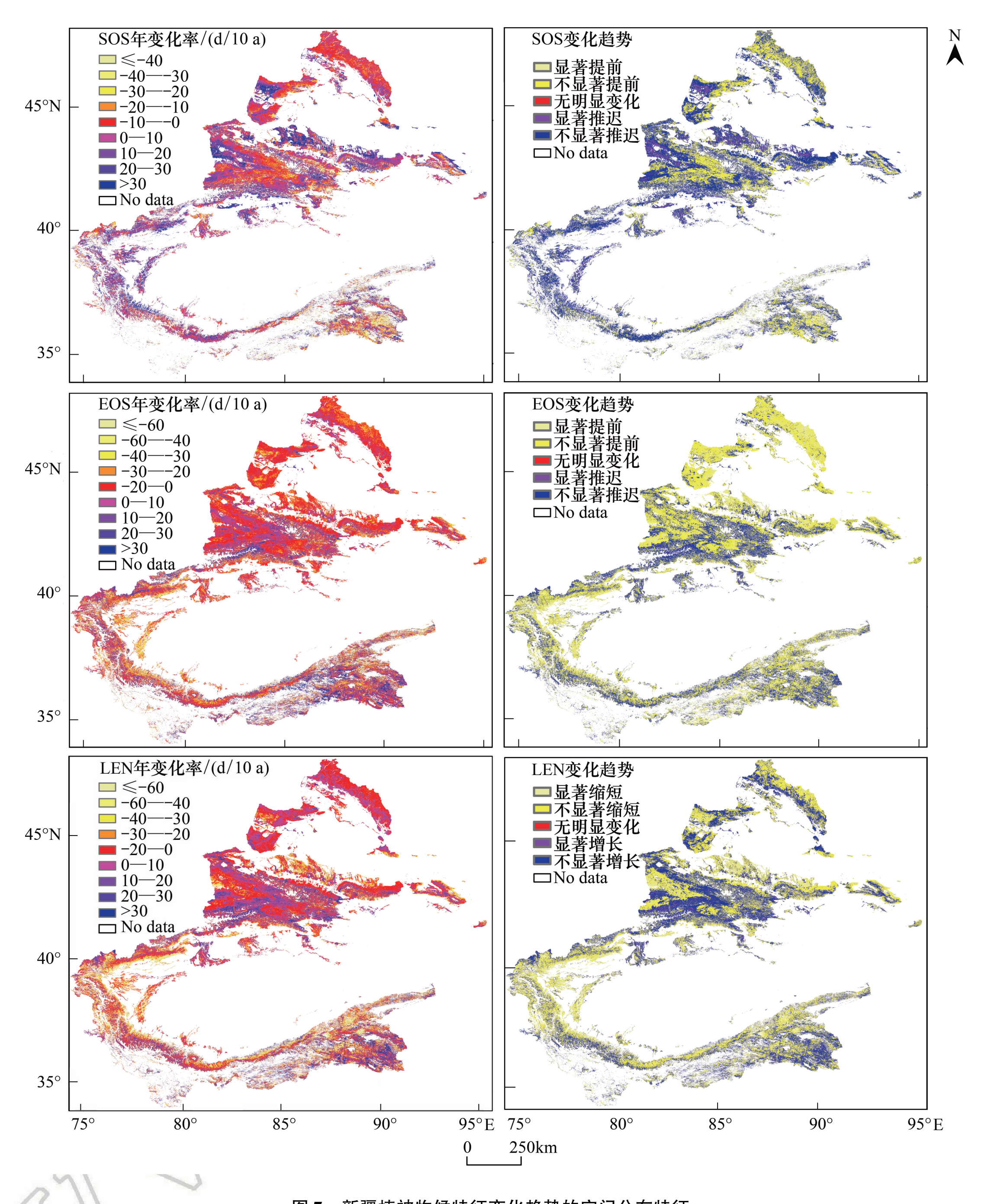


图 7　新疆植被物候特征变化趋势的空间分布特征

Fig.7　Spatial distribution of inter-annual change trend and significance of SOS, EOS, and LEN from 2001 to 2016 in Xinjiang

SOS:生长季开始时间,Start of season;EOS:生长季结束时间,End of season;LEN:生长季长度,Length of season

由图 7 LEN 可得以下结论:①从总体上可得,除新疆伊犁和阿尔金山东南部的部分区域外,全疆其他区域的 LEN 主要呈缩短趋势。LEN 缩短、无明显变化和增长的区域分别占有效像元的 58.37%,0.05% 和 41.59%。②7.47%的区域呈显著缩短趋势,主要呈零星块状分布于全疆各绿洲中,而且位于南疆西南部的大部分绿洲区域都显示出显著缩短趋势,缩短幅度集中于大于 30d/10a。50.90%的区域呈不显著缩短趋势:从总体上看,除伊犁东部和南部、北疆中部和北部(北疆山地与绿洲、荒漠的过渡带)、昆仑山靠近冰川积雪区和阿尔金山东南部外的其他新疆区域均显示出缩短趋势;在南疆西南部各绿洲部分区域和全疆各山地较高海拔处至山麓区域(除北疆山区外)缩短的幅度大于 40d/10a,南疆北部绿洲和山地区域(昆仑山南部,阿尔金山东南部以外区域)缩短幅度集中于 0—30d/10a;北疆绿洲缩短幅度集中于 0—40d/10a,北疆山地缩短幅度集中

于 0—30d/10a;伊犁平原的缩短幅度集中于 0—40d/10a;东疆绿洲缩短幅度集中于 0—30d/10a。③0.05%的区域无明显变化,说明全疆大部分区域的 LEN 都有较大幅度的变动。④2.50%的区域呈显著增长趋势,39.09%的区域呈不显著增长趋势,主要分布于北疆山地与绿洲的过渡带、北疆南部绿洲的南端区域、伊犁山区、南疆和静县山地区域、和硕县山地区域、昆仑山靠近冰川积雪区与西北部北段区域、阿尔金山东南部区域(若羌县山地区),增长的幅度集中于 0—30d/10a,但在北疆玛纳斯县、昌吉市、乌鲁木齐县、托克逊县等山地区域,南疆和硕县部分区域、阿尔金山东南部区域、昆仑山西北部北端等区域的增长幅度可达大于 30d/10a,可见在高海拔地区 LEN 变动更为剧烈。

3.4 气候变化对新疆植被物候期的影响

环境因素对物候期影响更为显著,其中气温、光照和水分等气候因素是最主要的影响因子[26]。由前论述也可得出,在温带和寒带地区,控制植物物候变化的 3 个重要因素是温度、低温持续时间和光周期[3],另一方面,10℃是喜温植物适宜生长的起始温度,推算作物生育期、害虫发生期、各种虫期等数值时,往往都要依据有效积温,≥10℃有效积温是衡量某地区热量资源的重要指标,其时空分布差异性直接影响着农业布局以及生态格局[46];但是在日平均气温低于 10℃时也可能存在某个时间段的温度超过 10℃的情况,因此以日平均气温求算月平均气温来代替有效积温的指标,以更好的考虑到所有情况,因为有效积温是根据日平均气温进行推算[47],从这个层面考虑用平均温度代替有效积温具有一定的可行性。一些研究也表明物候期与前期其温度具有显著相关关系[48],同时由于气温的变化与物候期的变化不一定同时存在并显现出来,可能存在时间上的滞后性[27,49],以及由于全疆总体上 SOS 集中于 3 月中旬至 5 月上旬(平均第 74—122 天),EOS 集中于 10 月中旬至 12 月下旬(平均第 284—354 天),因此根据相关学者的研究[23,26-27,49],本研究选取植被生长季开始时间和结束时间的前 8 个月的气温、降水量和日照时数作为气象因子,应用冗余分析(RDA)来分析物候参数与气象因子之间的关系。将各物候参数与气象因子的排序结果用排序图(图 8,图 9)表示。RDA 可将研究对象和环境因子(箭头表示)排序表示在一个图上,箭头所处的象限表示环境因子与排序轴之间的正负相关性,箭头连线的长度代表某个环境因子与研究对象的相关程度的大小,连线越长表示这个环境因子对研究对象的分布影响越大。研究对象箭头之间的夹角和环境因子之间的夹角分别表示它们之间的相关性,一个环境因子的箭头长度越长表明与研究对象的相关性越大,对其影响也就越大。箭头之间夹角越小,相关性越大,箭头与排序轴的夹角代表着某个环境因子与排序轴的相关性大小[50]。

为了更好的展示同一月份中植被物候受不同气象因子的影响,针对不同的月份进行单独出图。由于每个图只有一个响应变量(物候参数),使得第一轴和第二轴完全正交(图 8,图 9),相关系数为零,从而所有环境变量的气象因子只与第一轴有相关性而与第二轴无相关性(表 1,表 2),因此在 RDA 排序结果图中显示出所有气象因子均集中在一个轴上,不能体现出环境变量(气象因子)和研究对象(物候参数)的夹角,但能通过象限直接判断二者的正负相关性,以及通过 RDA 分析能统计出不同因子之间和与物候特征的相关性,同时能直观的通过箭头连线的大小来判断某种气象因子对于物候特征的影响程度。从图 8 和表 1 可以得出以下结论:①生长季开始时间与前一年 10—12 月各月的平均气温相关性低,绝对值不超过 0.34,表明前一年气温因子对于 SOS 影响不大;但是 SOS 与 3—5 月各月的气温均呈显著负相关(绝对值均在 0.56 以上),在总体上的相关性达到了-0.82,表明 SOS 与春季的气温呈显著的负相关。②前一年 11 和 12 月与当年的 1 月、2 月、3 月的降水量均与 SOS 呈显著正相关(绝对值均在 0.52 以上),前一年 11 和 12 月—今年 2 月的总体降水量对 SOS 的影响尤其显著,相关性在 0.77 以上,表明冬季的降水量对 SOS 影响重大。3—5 月的总体降水量对 SOS 有较大的影响,相关性达到了 0.52,表明春季降水量对 SOS 的影响要低于冬季降水量。③前一年 11 月、12 月和当年 2 月、5 月的日照时数与 SOS 呈显著负相关关系(相关性绝对值在 0.40-0.56),前一年 11 月—今年 2 月的日照时数对 SOS 的影响最大(相关性达-0.67),表明 SOS 主要受冬季日照时数的影响。④所选的不同气象因子接近 100%的解释了 SOS 的变化特征,第一轴解释的信息量可达 72%以上,第二轴可达 11%以上,不同气象因子前两轴累积解释的信息量都为 1,表明排序轴反映了气象因子与 SOS 的绝大部分信息。⑤从以上几点可

以得出,新疆植被生长季开始时间主要受到春季气温、冬季降水和冬季日照时数的影响,受到前一年 11—12 月的降水和日照时数的显著影响;但是,由于 SOS 同时受到春季和冬季降水量的显著作用,因此从总体上可以得出新疆植物生长季开始时间受降水量大小的影响>日照时数≈平均气温,表明干湿程度对新疆植被的变化大于温度,这与浙江省的情况类似[21]。水是影响植物物候期的另一重要气候因子,降水对植物开花的影响在热带和干旱地区尤其明显[51]。新疆远离海洋,深居内陆,降水量少,形成了温带大陆性气候,普遍存在干旱情况[33,35],而干旱会延缓植物的生长发育,使发育的物候期推迟,因此干旱发生时,光、热条件再好,植物也不能利用,在这种情况下,水就成为影响植物生长发育的主要生态因子[51]。但是新疆 1—3 月份的降水主要是以雪的形式出现,降雪后地表反照率增大,融雪也需要大量的热量,导致地表温度降低,植被萌芽返青时期出现推迟[26],所以降水量是影响新疆生长季始期的主导因子且呈显著的正相关关系。同时,有关研究表明,持续延长日照时间最能促进植物发芽开发[51]。因年际温度变化幅度大,那些由光周期决定物候期开始的类群便能通过适时的解除休眠来很好地躲避由升温带来的可能伤害[15],所以日照时数与 SOS 呈显著的负相关关系。

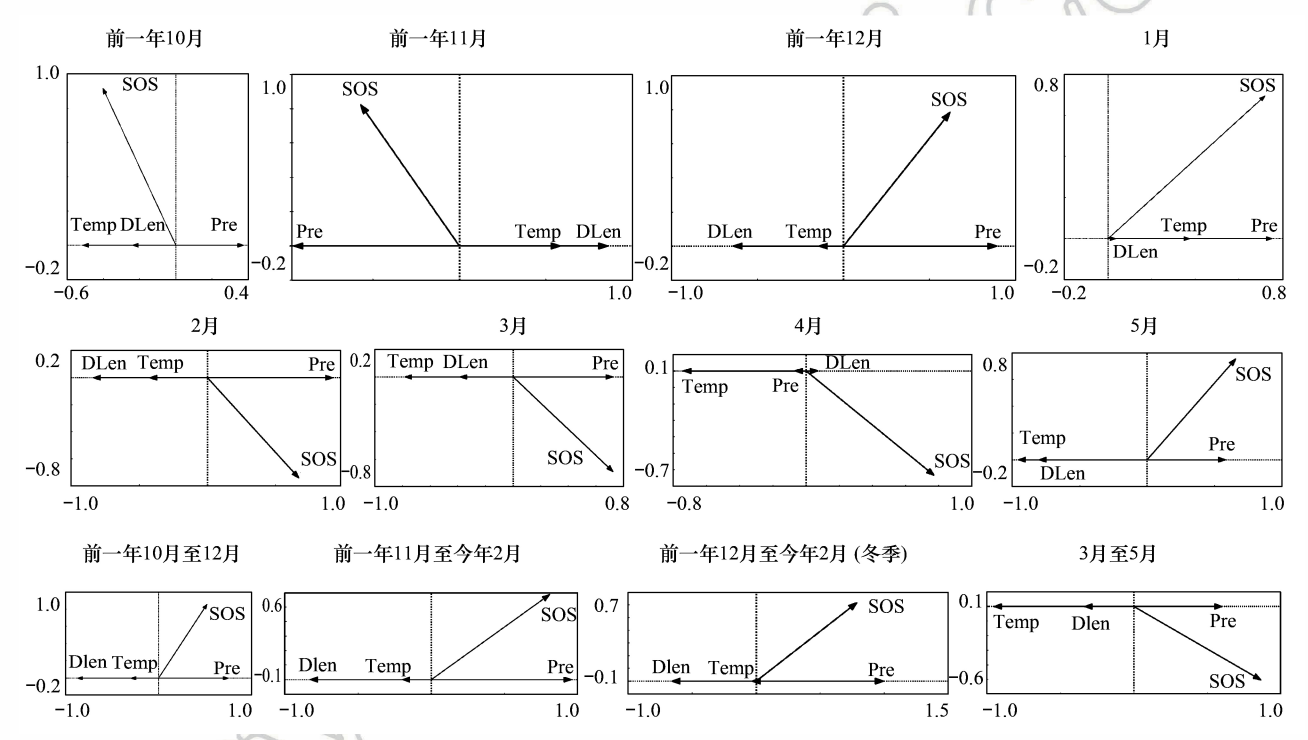


图 8　新疆生长季开始时间与气象因子的 RDA 排序图

Fig.8　RDA ordination diagram of the SOS and meteorological factors in Xinjiang

Temp:气温,Temperature;Pre:降水,Precipitation;DLen:日照时数,Sunshine duration;SOS:生长季开始时间,Start of season

从图 9 和表 2 中可以得出以下结论:①EOS 与 10 月气温呈较明显的负相关(相关系数为-0.47),与 11 月气温呈较明显正相关(相关系数为 0.374),其他月份的气温对 EOS 的影响都较小,相关性不超过 0.25,如 6—8 月,9—11 月,10—12 月,表明总体上气温对 EOS 的影响较小。②7—8 月的降水量与 EOS 呈显著正相关,总体降水量与 EOS 相关性达 0.63;9—11 月和 10—12 月的降水量与 EOS 呈较显著负相关(相关系数绝对值在 0.40 以上);表明夏季和秋季的降水量对于 EOS 有显著影响。③不同月份的日照时数与 EOS 的影响均较小,相关系数绝对值均小于 0.33。7—8 月日照时数与 EOS 呈较明显的负相关(相关系数为-0.33)。从 6—12 月各月来看,日照时数与 EOS 主要呈负相关关系。④与 SOS 类似,所选的不同气象因子接近 100%的解释了 EOS 的变化特征,第一轴解释的信息量可达 66%以上,第二轴可达 19.7%以上(除日照时数外,其第二轴的解释信息量更大),不同气象因子前两轴累积解释的信息量都为 1,说明排序轴反映了气象因子与 EOS 的绝大部分信息。⑤从以上几点可以得出,新疆植被生长季结束时间主要受当年 10—11 月气温、7—8 月和 9—11 月

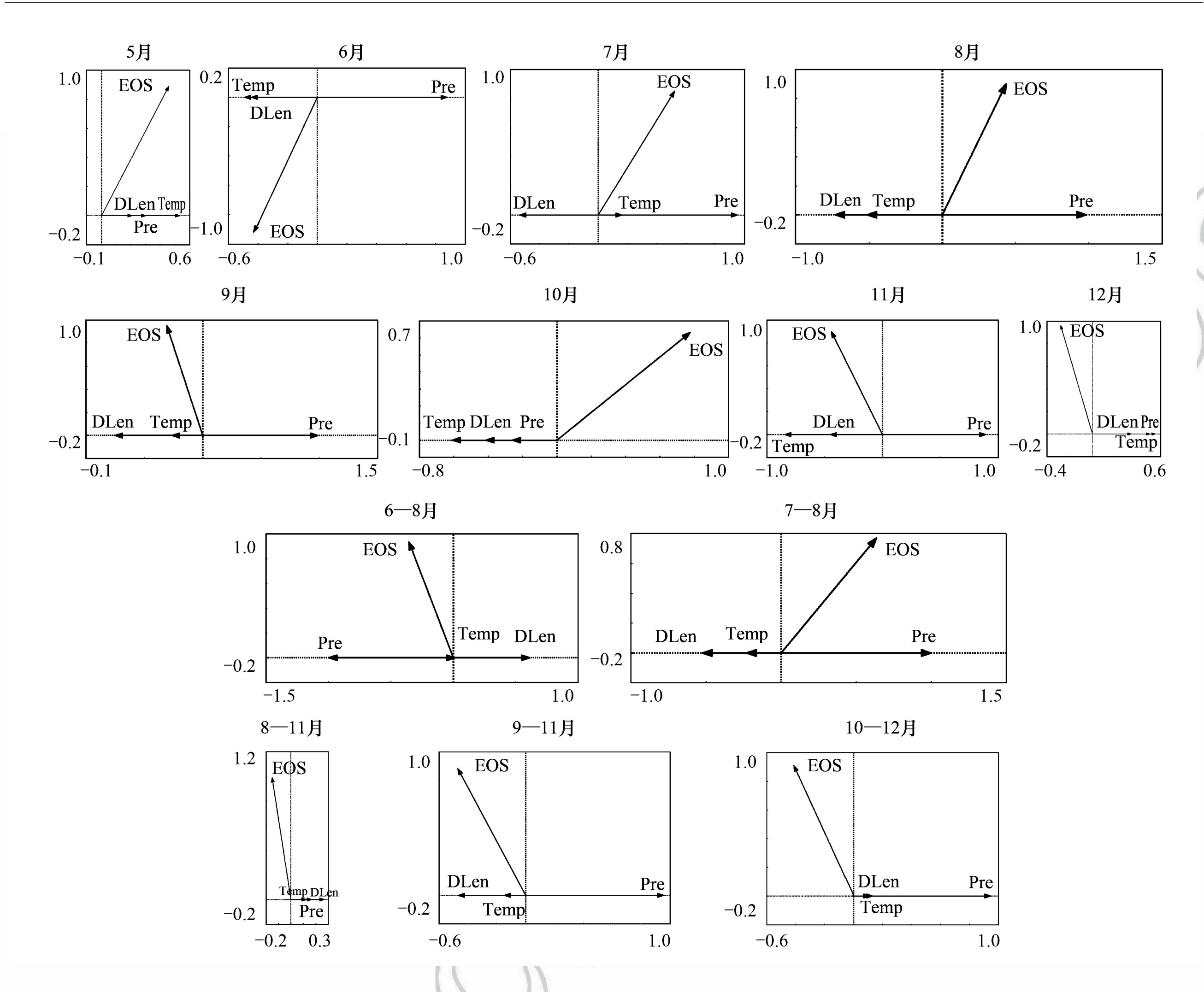


图 9 新疆生长季结束时间与气象因子的 RDA 排序图

Fig.9 RDA ordination diagram of EOS and meteorological factors in Xinjiang

Temp:气温,Temperature;Pre:降水,Precipitation;DLen:日照时数,Sunshine duration;EOS:生长季结束时间,End of season

降水、7—8 月日照时数的影响,但从总体来看,降水和气温对于 EOS 的影响最为显著。原因可能在于叶片从生长到衰老需要一定的积温,物候期持续的时期与活动积温有显著的相关性[51-52]。前期气温的升高使得植物叶片所需的积温用较短时间即可满足,提前达到黄枯期[26],同时降水量增多有利于植被的生长,促使生长季长度延长,从而使得植被生长季结束时间推迟,所以降水量与 EOS 呈显著正相关关系。

表 1 2001—2012 年新疆生长季开始时间 RDA 排序前两轴与气象因子的相关系数

Table 1 Correlation of two SOS's RDA axes and meteorological factors of each plot in Xinjiang from 2001 to 2012

因子 Factor	气温 Temperature		降水 Precipitation		日照时数 Sunshine duration	
	第 1 排序轴 Axis 1	第 2 排序轴 Axis 2	第 1 排序轴 Axis 1	第 2 排序轴 Axis 2	第 1 排序轴 Axis 1	第 2 排序轴 Axis 2
前一年 10 月 Last October	0.206	0.000	−0.151	0.000	0.096	0.000
前一年 11 月 Last November	−0.332	0.000	0.545	0.000	−0.488	0.000
前一年 12 月 Last December	−0.088	0.000	0.552	0.000	−0.398	0.000
1 月 January	0.269	0.000	0.541	0.000	0.024	0.000
2 月 February	−0.284	0.000	0.617*	0.000	−0.562	0.000
3 月 March	−0.565	0.000	0.521	0.000	−0.277	0.000
4 月 April	−0.571*	0.000	−0.052	0.000	0.055	0.000

续表

因子 Factor	气温 Temperature 第 1 排序轴 Axis 1	气温 Temperature 第 2 排序轴 Axis 2	降水 Precipitation 第 1 排序轴 Axis 1	降水 Precipitation 第 2 排序轴 Axis 2	日照时数 Sunshine duration 第 1 排序轴 Axis 1	日照时数 Sunshine duration 第 2 排序轴 Axis 2
5 月 May	-0.627 *	0.000	0.382	0.000	-0.527	0.000
前一年 10—12 月 Last October to December	-0.154	0.000	0.389	0.000	-0.452	0.000
前一年 11 月—今年 2 月 Last November to February this year	-0.160	0.000	0.777 *	0.000	-0.672 *	0.000
前一年 12 月—今年 2 月(冬季) Last December to February this year	-0.025	0.000	0.784 *	0.000	-0.518	0.000
3—5 月 March to May	-0.824 *	0.000	0.520	0.000	-0.291	0.000
特征值 Eigenvalue	0.889	0.111	0.718	0.282	0.732	0.268
特征值总和 Eigenvalue summation	1		1		1	

  * 为通过 0.05 可信度检验的显著因子

表 2　2001—2012 年新疆生长季结束时间 RDA 排序前两轴与气象因子的相关系数

Table 2　Correlation of two EOS's RDA axes and meteorological factors of each plot in Xinjiang from 2001 to 2012

因子 Factor	气温 Temperature 第 1 排序轴 Axis 1	气温 Temperature 第 2 排序轴 Axis 2	降水 Precipitation 第 1 排序轴 Axis 1	降水 Precipitation 第 2 排序轴 Axis 2	日照时数 Sunshine duration 第 1 排序轴 Axis 1	日照时数 Sunshine duration 第 2 排序轴 Axis 2
5 月 May	0.245	0.000	0.138	0.000	0.096	0.000
6 月 June	0.207	0.000	-0.370	0.000	0.188	0.000
7 月 July	0.085	0.000	0.497	0.000	-0.280	0.000
8 月 August	-0.223	0.000	0.428	0.000	-0.318	0.000
9 月 September	0.082	0.000	-0.306	0.000	0.233	0.000
10 月 October	-0.472	0.000	-0.200	0.000	-0.321	0.000
11 月 November	0.374	0.000	-0.395	0.000	0.199	0.000
12 月 December	-0.155	0.000	-0.141	0.000	-0.096	0.000
6—8 月 June to August	-0.004	0.000	0.354	0.000	-0.217	0.000
7—8 月 July to August	-0.146	0.000	0.635 *	0.000	0.333	0.000
8—11 月 August to November	-0.019	0.000	-0.025	0.000	-0.040	0.000
9—11 月 September to November	0.068	0.000	-0.447	0.000	0.218	0.000
10—12 月 October to December	-0.054	0.000	-0.392	0.000	-0.046	0.000
特征值 Eigenvalue	0.803	0.197	0.659	0.341	0.406	0.594
特征值总和 Eigenvalue summation	1		1		1	

  * 为通过 0.05 可信度检验的显著因子

4　结论

(1) 新疆物候特征具有明显的纬向分布和垂直地带分布特征,海拔在物候的地域分异中扮演着重要作用。新疆生长季始期集中于 3 月中旬至 5 月上旬(平均第 74—122 天),生长季末期集中于 10 月中旬至 12 月下旬(平均第 284—354 天)。海拔对于植被物候特征的影响为:海拔每升高 1000m,生长季开始时间推迟 8.9d,生长季结束时间提前 6.6d,生长季长度缩短 15.5d。

(2) 与全球大背景下物候特征趋势相反,新疆植被物候生长季开始时间呈推迟趋势,推迟的幅度为 1.9d/10a;生长季结束时间呈提前趋势,提前的幅度为 3.66d/10a;生长季长度呈缩短趋势,缩短的幅度为 5.6d/10a,生长季长度变动幅度较大。新疆绿洲、山地的植被生长季开始时间推迟幅度分别为 5.6d/10a 和 1.2d/10a。除东疆地区外,全疆及不同分区均呈现出绿洲及平原生长季开始时间较早,山地区域较迟,总体上二者之间相差 9d 左右;全疆及不同分区均呈现出山地植被生长季结束时间结束的较早,绿洲结束的较迟,总体上二者之

间相差 16d 左右;除东疆地区外,全疆及不同分区的生长季长度均为绿洲及平原区域>山地,二者总体上相差近 25d,同样显示出了垂直地带性分布的特征。

(3) 通过冗余分析表明排序轴解释了物候特征与气象因子关系的绝大部分信息,降水量、气温和日照时数是影响新疆植被物候期的重要影响因素。生长季开始时间受前一年冬季降水量的影响最为显著,也受到当年春季气温和前一年冬季日照时数的显著影响,其与降水量呈正相关,与气温和日照时数呈负相关。夏季和秋季降水量新疆植被生长季结束时间的主要影响因素,除 10—11 月份的气温和 7—8 月日照时数有稍高的影响外,在总体上受气温和日照时数的影响较小。

本研究只是以遥感影像为数据源,从宏观角度来探讨新疆近 16 年来植被物候的总体变化趋势,并不与实际的植物物候完全一致,因此以后还应该做按不同生态分区和海拔高度进行典型植被采样进行精度验证,以及更加深入的探讨为什么新疆植被物候年际变化趋势有别于国内与全球物候变化的趋势与方向。

参考文献(References):

[1] 陆佩玲,于强,贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应. 生态学报, 2006, 26(3): 923-929.

[2] Mariano G C, Morellato L P C, Almeida J, Alberton B, de Camargo M G G, Torres R S. Modeling plant phenology database: Blending near-surface remote phenology with on-the-ground observations. Ecological Engineering, 2016, 91: 396-408.

[3] 莫非,赵鸿,王建永,强生才,周宏,王绍明,熊友才. 全球变化下植物物候研究的关键问题. 生态学报, 2011, 31(9): 2593-2601.

[4] Brown M E, Beurs K M D, Marshall M. Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26 years. Remote Sensing of Environment, 2012, 126(11): 174-183.

[5] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, Ryu Y, Sonnentag O, Toomey M. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 169(3): 156-173.

[6] Sakamoto T, Wardlow B D, Gitelson A A, Verma S B, Suyker A E, Arkebauer T J. A Two-Step Filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(10): 2146-2159.

[7] Bolton D K, Friedl M A. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 173(2): 74-84.

[8] Sakamoto T, Gitelson A A, Arkebauer T J. MODIS-based corn grain yield estimation model incorporating crop phenology information. Remote Sensing of Environment, 2013, 131: 215-231.

[9] Chmielewski F M, Müller A, Bruns E. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 121(1/2): 69-78.

[10] Steltzer H, Post E. Seasons and life cycles. Science, 2009, 324(5929): 886-887.

[11] 方修琦,余卫红. 物候对全球变暖响应的研究综述. 地球科学进展, 2002, 17(5): 714-719.

[12] 丛楠,沈妙根. 1982—2009 年基于卫星数据的北半球中高纬地区植被春季物候动态及其与气候的关系. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2737-2746.

[13] 丁明军,张镱锂,孙晓敏,刘林山,王兆锋. 近 10 年青藏高原高寒草地物候时空变化特征分析. 科学通报, 2012, 57(33): 3185-3194.

[14] Peñuelas J, Filella I. Responses to a warming world. Science, 2001, 294(5543): 793-795.

[15] Körner C, Basler D. Phenology under global warming. Science, 2010, 327(5972): 1461-1462.

[16] 马勇刚,张弛,塔西甫拉提·特依拜. 中亚区域陆表植被物候时空变化特征分析. 干旱区地理, 2014, 37(2): 310-317.

[17] 朴世龙,方精云. 1982-1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异. 地理学报, 2003, 58(1): 119-125.

[18] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Ciais P, Zhu B. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. Global Change Biology, 2006, 12(4): 672-685.

[19] 陈效逑,喻蓉. 1982—1999 年我国东部暖温带植被生长季节的时空变化. 地理学报, 2007, 62(1): 41-51.

[20] 余振,孙鹏森,刘世荣. 中国东部南北样带主要植被类型物候期的变化. 植物生态学报, 2010, 34(3): 316-329.

[21] 何月,樊高峰,张小伟,李正泉,高大伟. 浙江省植被物候变化及其对气候变化的响应. 自然资源学报, 2013, 28(2): 220-233.

[22] 李正国,杨鹏,周清波,王仰麟,吴文斌,张莉,张小飞. 基于时序植被指数的华北地区作物物候期/种植制度的时空格局特征. 生态学报, 2009, 29(11): 6216-6226.

[23] 宋春桥,游松财,柯灵红,刘高焕,钟新科. 藏北高原植被物候时空动态变化的遥感监测研究. 植物生态学报, 2011, 35(8): 853-863.

[24] 叶鑫,周华坤,刘国华,姚步青,赵新全. 高寒矮生嵩草草甸主要植物物候特征对养分和水分添加的响应. 植物生态学报, 2014, 38(2): 147-158.

[25] 侯学会,牛铮,高帅,黄妮. 基于 SPOT-VGT NDVI 时间序列的农牧交错带植被物候监测. 农业工程学报, 2013, 29(1): 142-150.

[26] 顾润源,周伟灿,白美兰,李喜仓,邸瑞琦,杨晶. 气候变化对内蒙古草原典型植物物候的影响. 生态学报, 2012, 32(3): 767-776.

[27] 马新萍,白红英,贺映娜,秦进. 基于 NDVI 的秦岭山地植被遥感物候及其与气温的响应关系——以陕西境内为例. 地理科学, 2015, 35(12): 1616-1621.

[28] Zhou J H, Cai W T, Qin Y, Lai L M, Guan T Y, Zhang X L, Jiang L H, Du H, Yang D W, Cong Z T, Zheng Y R. Alpine vegetation phenology dynamic over 16 years and its covariation with climate in a semi-arid region of China. Science of the Total Environment, 2016, 572: 119-128.

[29] Zeng L L, Wardlow B D, Wang R, Shan J, Tadesse T, Hayes M J, Li D R. A hybrid approach for detecting corn and soybean phenology with time-series MODIS data. Remote Sensing of Environment, 2016, 181: 237-250.

[30] Melaas E K, Sulla-Menashe D, Gray J M, Black T A, Morin T H, Richardson A D, Friedl M A. Multisite analysis of land surface phenology in North American temperate and boreal deciduous forests from Landsat. Remote Sensing of Environment, 2016, 186: 452-464.

[31] Dong J W, Xiao X M, Menarguez M A, Zhang G L, Qin Y W, Thau D, Biradar C, Moore III B. Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine. Remote Sensing of Environment, 2016, 185: 142-154.

[32] 夏传福,李静,柳钦火. 植被物候遥感监测研究进展. 遥感学报, 2013, 17(1): 1-16.

[33] 王智,师庆三,王涛,师庆东,常顺利,张履冰. 1982—2006 年新疆山地-绿洲-荒漠系统植被覆盖变化时空特征. 自然资源学报, 2011, 26(4): 609-618.

[34] 师庆东,肖继东,潘晓玲,吕光辉,陆海燕. 近 20a 来新疆植被覆盖变化特征研究. 干旱区研究, 2004, 21(4): 389-394.

[35] 邵霜霜,师庆东. 基于 FVC 的新疆植被覆盖度时空变化. 林业科学, 2015, 51(10): 35-42.

[36] 师庆东,吕光辉,潘晓玲,程维明. 遥感影像中分区分类法及在新疆北部植被分类中的应用. 干旱区地理, 2003, 26(3): 264-268.

[37] 王智,常顺利,师庆东,马珂,梁凤超. 基于 FVC 指数的中国西北干旱区植被覆盖变化 Markov 过程. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1129-1136.

[38] 布仁, 包玉海. 基于 MOD13A1 的锡林郭勒草原近 13 年植被覆盖度变化分析// 风险分析和危机反应中的信息技术——中国灾害防御协会风险分析专业委员会第六届年会论文集. 北京: 中国灾害防御协会风险分析专业委员会, 2014.

[39] Zhang T T, Qi J G, Gao Y, Ouyang Z T, Zeng S L, Zhao B. Detecting soil salinity with MODIS time series VI data. Ecological Indicators, 2015, 52: 480-489.

[40] Shen M G, Tang Y H, Chen J, Zhu X L, Zheng Y H. Influences of temperature and precipitation before the growing season on spring phenology in grasslands of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1711-1722.

[41] 于文婧, 孙丹峰, 曲葳. 基于冗余分析的宁夏平罗耕地土壤盐渍化特征研究. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 103-110.

[42] 马勇刚, 张弛, 塔西甫拉提·特依拜. 中亚及中国新疆干旱区植被物候时空变化. 气候变化研究进展, 2014, 10(2): 95-102.

[43] Julien Y, Sobrino J A. Global land surface phenology trends from GIMMS database. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(13): 3495-3513.

[44] Jeong S J, Ho C H, Gim H J, Brown M E. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2385-2399.

[45] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, Slayback D, Shabanov N V, Myneni R B. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D17): 20069-20083.

[46] 刘少华,严登华,翁白莎,邢子强,王刚. 近 50a 中国≥10℃有效积温时空演变. 干旱区研究, 2013, 30(4): 689-696.

[47] 肖悦岩. 介绍一种计算有效积温的方法——根据日最高最低气温. 植物保护, 1983, 9(2): 43-45.

[48] 仲舒颖,葛全胜,郑景云,戴君虎,王焕炯. 近 30 年北京自然历的主要物候期、物候季节变化及归因. 植物生态学报, 2012, 36(12): 1217-1225.

[49] 俎佳星,杨健. 东北地区植被物候时序变化. 生态学报, 2016, 36(7): 2015-2023.

[50] 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云. 基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究. 环境科学, 2012, 33(6): 2131-2138.

[51] 王连喜,陈怀亮,李琪,余卫东. 植物物候与气候研究进展. 生态学报, 2010, 30(2): 447-454.

[52] Zhang X B, Ren J R, Zhang D E. Phenological observations on Larix principis-rupprechtii Mayr. in primary seed orchard. Journal of Forestry Research, 2001, 12(3): 201-204.